نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی DOI: 10.22067/civil.v33i2.76033 سال سی و سوم، شمارهٔ دو، ۱۳۹۹

شبیه‌سازی سه‌بعدی پدیدهٔ رهایی متناوب گردابه‌ها و انتقال رسوب بستر حول موانع در معرض جریان با استفاده از Flow3D*

مقاله علمی – پژوهشی

نازیلا کاردان(۱) حبیب حکیم زاده(۲) یوسف حسن زاده(۳)

چکیده پل‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی ارتباطی به شمار می‌روند. برخورد جریان به پایهٔ پل‌ها فرسایش اطراف پایه و آسیب‌دیدگی آن را به دنبال دارد. ازاین‌رو یکی از مباحث مهم در زمینهٔ ایمنی پل‌ها، کنترل فرسایش بستر اطراف پایه‌ها است. تاکنون مدل‌های فیزیکی مختلفی در آزمایشگاه برای بررسی رفتار جریان و فرسایش بستر پیرامون آن ساخته شده‌اند که صرف‌نظر از هزینه و زمان‌بر بودن آزمایش‌ها، مشکلات ناشی از تغییرات مقیاس را نیز به همراه دا شته‌اند. امروزه با ا ستفاده از کدهای دینامیک سیّالات محا سباتی کارآمدتر، رفتار هیدرودینامیکی سیّالات به‌طور گسترده‌تری بررسی می‌شود. در این تحقیق برای این منظور از نرم‌افزار Flow3D ا ستفاده شده ا ست. این پژوهش به شبیه سازی جریان اطراف مدل پایه‌های پل مختلف پرداخته و الگوی جریان و فر سایش بستر را بررسی می‌نماید. با توجّه به حسا سیت مدل‌های عددی به تعداد سلول‌های شبکه در میدان محا سباتی، صحّت‌سنجی تعداد مختلف شبکه، با مقایسه نیمرخ‌های سرعت انجام یافته ا ست. سه مدل آ شفتگی مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفته و پس از برر سی نیمرخ‌های سطح آزاد آب، الگوی جریان اطراف پایه و عدد ا ستروهال، شبیه سازی جریان با مدل آ شفتگی LES انجام گردیده ا ست. تعداد ۱۵ مدل نیز برای ارزیابی دو پارامتر مهم عامل آب‌شـستگی، جدایش جریان و جریان رو به پایین، انتخاب شـده‌اند. ابزارهای انتخابی در این را ستا، سکو، مقطع هند سی پایه و شکاف می‌با شند. نتایج ن شان داد در اغلب موارد ا ستفاده از یک ابزار کنترل آب ش ستگی بهتر از ترکیب ابزارهای مختلف عمل می‌کند با به‌کارگیری شکل عدسی به‌عنوان مقطع هندسی پایه، عمق آب‌شستگی تا ۵۸ درصد کاهش و با مدل ترکیبی مقطع م ستطیلی گردگو شه، سکو و شکاف بیشینهٔ عمق فر سایش یافته تا ۵۰ در صد کاهش ن شان داد. نتایج بهد ست‌آمده بیانگر آن ا ست که کنترل جدایش جریان و پدیدهٔ شکست گردابه به‌مراتب بیش از کنترل جریان رو به پایین در کاهش فرسایش بستر مؤثر است.

واژه‌های کلیدی شبیه‌سازی عددی، رهایی متناوب گردابه‌ها، نرم‌افزار Flow3D، مدل آشفتگی، آب‌شستگی، پایهٔ پل.

Three Dimensional Simulation of Vortex SheddingPhenomenon and Sediment Transportaround Obstacles subjected to flow, Using Flow3D

N. kardan H. Hakimzadeh Y. Hassanzadeh

Abstract *Bridges are known as one of the most important communicational hydraulic structures. This is particularly so important in bridge piers exposed to river currents.The flow contact with bridge piers causes erosion around them and would result in damage. Therefore, controlling the erosion around the piers is one of the most important objects in the bridge safety. Many different experimental models have been prepared so far to investigate the flow pattern and local scour around this structure. Regardless of the cost and time of the experiments, problems resulting from changes in scale are also available. Nowadays, the Hydrodynamic behavior of the fluid is more extensively investigated by using the more efficient codes of computational fluid dynamic (CFD). The Flow3D software is used for this regard. This study focuses on the simulation of flow around the different bridge piers and studied the flow pattern and bed erosion around them. In this regard, the assumption of incompressible fluid is used and the sharp free surface is modeled by Volume of Fluid (VOF). Considering the sensitivity of numerical models to the number of cells in the computational domain, verifying the number of cells has been done by comparing the velocity profiles. Three different turbulence models also are investigated, and the free surface profiles, flow pattern around the pier and the Strouhal number are compared. Finally, the flow simulation is done by LES turbulence model. For investigation the two key factors causing local scouring, flow separation and downward flow in upstream of the pier, th1 10 models is selected. The countermeasures that considered in this regard include berm, cross-section and middle slot. The results show that the effect of flow separation control in reducing the bed erosion is much more than controlling the downward flow. Also the results revealed that in most cases using one countermeasure may be acts more better than situations different countermeasures was applied. In using lenticular cross-section, the scouring depth weas decreased up to 58% and with using the combined round-nosed rectangular cross-section, berm, and slot, the scouring depth showed decreasing up to 50%. Also, it was concluded that controlling the flow separation from the pier in boundary layer and the vortex shedding affect the bed erosion much more than the downward flow in pier upstream.*

Key Word Numerical simulation, Vortex shedding, Flow3D software, Turbulence model, Scour, Bridge pier.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۷/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۶/۱۰ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنّی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز.

Email: n.kardan@azaruniv.ac.ir

(۲) استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز.

(۳) استاد، گروه مهندسی آب، قطب علمی هیدروانفورماتیک، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

مقدّمه

آب‌شستگی پدیده‌ای است که در اثر فرسایش بستر توسط جریان آب و حمل مواد بستر توسط نیرویی که این جریان به مواد بستر وارد می‌کند، به وجود می‌آید [1]. رادکیوی و اتما آب‌شستگی را پدیده‌ای طبیعی تعریف کرده‌اند که درنتیجهٔ عمل فرسایش بستر توسط جریان و حمل مواد جداشده از آن توسط این جریان رخ می‌دهد [2]. سومر و فردسو بین آب‌شستگی و فرسایش کلّی، تفاوت قائل شده و آب‌شستگی را فرسایش مصالح بستر به سبب حضور یک سازه در معرض جریان دانسته‌اند [3].

مطالعات آزمایشگاهی فراوانی در زمینهٔ مدل‌سازی جریان و آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل توسط پژوهشگران مختلف صورت گرفته است. به‌عنوان نمونه می‌توان به مطالعات لارسن و تاچ، شن و همکاران، ملویل و درگاهی، بروسرز و رادکیوی، گراف و ایسراتو، دریسدل، گریمالدی و همکاران، گادیو و همکاران و گیه‌مو و همکاران اشاره نمود [12-4]. اغلب این مطالعات آزمایشگاهی مبتنی بر شرایط ایده‌ال‌سازی شده هستند لیکن اعمال شرایط پیچیده در مدل‌سازی آزمایشگاهی مشکل خواهد بود. ازاین‌رو یک فرایند رضایت‌بخش جهت بررسی جریان و انتقال رسوب، بهره‌گیری از مدل‌های عددی است. نرم‌افزار Flow3D یک مدل عددی برای شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در هندسه‌های پیچیده است که توسط شرکت FlowScience در سال ۲۰۰۸ ارائه گردیده است.

ریچاردسون و پانچانگ حفرهٔ آب‌شستهٔ ایجادشده در اطراف پایهٔ پل استوانه‌ای را با Flow3D مورد مطالعه قرار داده و نتایج عددی به‌دست‌آمده را با نتایج آزمایشگاهی ملویل و رادکیوی مقایسه نمودند. ایشان به اهمیّت استفاده از اندازهٔ سلول‌های مناسب در شبکه‌بندی مدل تأکید کردند [13]. ین و همکاران جریان رو به پایین در بالادست پایه را در شرایط بستر صاف محاسبه نمودند تا با مقیاس‌بندی سرعت جریان در بالادست پایه، شدّت جت جریان در حفرهٔ آب‌شسته را به دست آورند [14].

واسکو و والش به بررسی فرسایش بستر پیرامون پایه‌های مرکب با استفاده از این نرم‌افزار پرداختند. ایشان نشان دادند نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی اختلاف بسیار اندکی با نتایج تجربی موجود دارد [15]. عبدالعزیز و همکاران به مطالعهٔ عددی الگوی جریان و فرسایش بستر پیرامون پایهٔ پل استوانه‌ای با نرم‌افزار Flow3D پرداختند [16]. مهرزاد به بررسی پدیدهٔ آب‌شستگی حول پایه‌های مخروطی شکاف‌دار و بدون شکاف پرداخته و نشان داد که نتایج عددی و تجربی تطابق خوبی داشتند [۱۷]. اسدی و همکاران به بررسی اثر قطر پایهٔ پل بر الگوی جریان در کانال مستقیم پرداخته و دریافتند انطباق نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی مؤید دقّت بالای نرم‌افزار Flow3D در شبیه‌سازی الگوی جریان و گردابه‌های اطراف پایه است [۱۸]. حمیدی‌فر و امید (۱۳۹۱) شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی در آب‌راهه‌های با مقطع مرکب را انجام دادند [۱۹]. توحیدی (۱۳۹۲) به‌صورت عددی به بررسی تأثیر پایه‌های با منحنی لگاریتمی در کاهش فرسایش بستر پرداخت. ایشان کاهش ٤۰ درصدی در عمق آب‌شستگی را گزارش نمود [۲۰]. حسن‌زاده و همکاران تأثیر استفاده از مدل ترکیبی مقطع هندسی و شکاف را به‌صورت تجربی بررسی و نشان دادند به دلیل احتمال گرفتگی شکاف در زمان وقوع سیلاب، این ابزار نمی‌تواند گزینهٔ مناسبی برای کنترل آب‌شستگی باشد [۲۱].

در پژوهش حاضر، سه ابزار مقطع هندسی پایه، سکو و شکاف میانی به‌صورت منفرد و نیز به‌صورت ترکیبی جهت کنترل آب‌شستگی پیشنهاد شده‌اند. هدف از انتخاب این ابزارها مطالعه تأثیر دو پارامتر اصلی آب‌شستگی، جدایش جریان از وجوه جانبی و جریان رو به پایین، بر آغاز و گسترش آب‌شستگی است. در ترکیب سکو و شکاف، جریان رو به پایین کنترل شده و با به‌کارگیری مقطع هندسی پایه، جدایش جریان از وجوه جانبی پایه کمینه می‌گردد. ترکیب این روش‌ها نیز در راستای کنترل توأمان دو پارامتر فوق بوده است. هرکدام

از ترکیب‌ها تأثیراتی در کنترل آب‌شستگی داشته و حتّی برخی توانسته‌اند کاهش قابل توجّهی در عمق آب‌شستگی ایجاد نمایند، بااین‌وجود دارای ضعف‌هایی بوده‌اند که شاید به لحاظ سازه‌ای و یا عوامل اجرایی برای زمان حال توجیه‌پذیر نباشند. این ترکیبات، شامل این مواردند:

۱. مقاطع هندسی پایه (مقاطع دایره‌ای، مستطیلی گردگوشه و عدسی)؛
۲. پایهٔ استوانه‌ای با سکو (ارتفاع‌های مختلف برای سکو بررسی شده است)؛
۳. ترکیب سکو، مقطع هندسی پایه و شکاف میانی.

بنابراین درمجموع تعداد ۱۵ مدل با نرم‌افزار Flow3D مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. عمده‌ترین هدف تحقیق، بررسی دو عامل ایجادکنندهٔ آب‌شستگی است.

مواد و روش‌ها

نرم‌افزار Flow3D

جهت شبیه‌سازی عددی معادلات حاکم بر جریان‌های آشفته، از بستهٔ نرم‌افزاری Flow3D استفاده شده است که توانایی محاسبات بالا در جریان کانال‌های باز را دارد. در این مدل، معادلات حاکم بر جریان با استفاده از تقریب-های حجم محدود حل می‌شوند. در این روش میدان محاسباتی به شبکه‌هایی با سلول‌های مستطیلی تقسیم-بندی شده که برای هر سلول میانگین کمیّت‌های وابسته وجود دارد؛ یعنی تمامی متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند به‌جز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. در این نرم‌افزار از دو تکنیک عددی حجم سیّال (VOF) و روش کسر مساحت- حجم مانع (FAVOR) برای شبیه‌سازی هندسی مرزها استفاده می‌شود. روش حجم سیّال برای نشان دادن رفتار سیّال در سطح آزاد آب (مرز آب‌وهوا) و روش کسر مساحت – حجم مانع برای شبیه‌سازی سطوح و مرزهای هندسی احجام صلب (مرز آب و جامد) کاربرد دارد. برای شبیه‌سازی اثرات آشفتگی، پنج مدل آشفتگی طول اختلاط پرانتل، مدل تک‌معادله‌ای، مدل دومعادله‌ای ($k-\varepsilon$)، مدل RNG و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در این نرم‌افزار معرفی شده است [22].

معادلات مورد استفاده در نرم‌افزار Flow3D

مدل هیدرودینامیک بر مبنای حل معادلات ناویراستوکس سه‌بعدی و معادلهٔ پیوستگی است. معادلات ناویراستوکس و پیوستگی مورد استفاده در Flow3D برای جریان‌های غیرقابل تراکم در ادامه آمده است [22]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}u_i A_i = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f}\left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_j} + G_i + f_i - k u_i \qquad (۲)$$

که u_i سرعت متوسط، P فشار، A_i کسر مساحت باز برای جریان در راستای i، V_f کسر حجم باز برای جریان، G_i شتاب ناشی از نیروهای وزنی، f_i شتاب ناشی از نیروهای ویسکوز، k ترم دراگ بین ذرات رسوب و ρ دانسیته سیّال است. تنش برشی بستر با استفاده از تابع دیواره برای جریان‌های آشفته سه‌بعدی محاسبه می‌گردد [22,23]:

$$u = u_\tau\left[\frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{Y}{\frac{\nu}{u_\tau}+k_s}\right)\right] \qquad (۳)$$

که u سرعت جریان، u_τ سرعت برشی، τ تنش برشی بستر، Y فاصله از دیواره، ν وسیکوزیته سینماتیکی، $\kappa=۰/۴$ ضریب فن-کارمن و k_s ضریب زبری نیکورادزه است.

مدل آب‌شستگی Flow3D. مدل آب‌شستگی نرم‌افزار Flow3D با استفاده از تقریب حجمی بقای جرم و معادلهٔ انتقال رسوب پخش (انتشار) – انتقال، میزان انتقال رسوب و آب‌شستگی بستر را برآورد می‌کند و با استفاده از روش کسر حجم سیّال ارتفاع سطح بستر در هر سلول محاسباتی را پیش‌بینی می‌نماید. مدل آب‌شستگی این نرم‌افزار شامل انتقال رسوبات بستر و رسوبات معلق

است. رسوبات بستر که توسط ذرات محصور شده‌اند به‌راحتی نمی‌توانند جابه‌جا شوند و درصورتی‌که فرسایش یابند و در سطح مشترک سیّال و رسوب به‌صورت معلّق درآیند می‌توانند حرکت کنند. با فرض جریان دو فازی ذرات رسوب در سیّال و برقراری رابطهٔ مومنتم در فاز پیوستهٔ سیّال، معادلهٔ (٤) و فاز ناپیوسته ذرات رسوبی معادلهٔ (٥) و از تفاضل معادلهٔ (٤) و معادلهٔ (٥)، رابطهٔ (٦) حاصل می‌شود [22]:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u}.\nabla \bar{u} = -\frac{1}{\bar{\rho}}\nabla P + F \qquad (٤)$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + \bar{u}.\nabla u_s = -\frac{1}{\rho_s}\nabla P + F - \frac{K}{f_s\rho_s}u_r \qquad (٥)$$

$$\frac{\partial u_{drift}}{\partial t} + \bar{u}.\nabla u_{drift} = \left(\frac{1}{\bar{\rho}} - \frac{1}{\rho_s}\right)\nabla P + F - \frac{K}{f_s\rho_s}u_r \qquad (٦)$$

که u_s سرعت ذرات رسوب، $\bar{u}\ (=(1-f_s)u + f_s u_s)$ سرعت متوسط حجمی سیّال، F نیروهای وزنی، $u_r\ (=u_s - u)$ سرعت نسبی ذرات رسوب و سیّال، $u_{drift}\ (=u_s - \bar{u})$ سرعت رانشی ذرات رسوب است. رابطهٔ بقای جرم برای جریان با سرعت متوسط حجمی سیّال $\nabla \bar{u} = 0$ نیز باید برقرار باشد. تنش برشی سبب فرسایش و جابه‌جا شدن رسوبات در سطح بستر می‌گردد. این فرسایش تابعی از تنش برشی بحرانی τ_{cr} و دانسیته سیّال و رسوب است. پارامتر شیلدز بحرانی θ_{cr} کمینه تنش برشی جهت بلند کردن ذرات رسوب از سطح مشترک سیّال و بستر فعّال را نشان می‌دهد [24]:

$$\theta_{cr,n} = \frac{\tau_{cr,n}}{g(\rho_s - \rho)d_n} \qquad (٧)$$

d_n قطر ذرّه رسوب و اندیس n به n امین ذرّه رسوب اشاره دارد. مقدار پایه برای عدد شیلدز بحرانی در بسترهای صاف افقی تعریف و معمولاً برابر مقدار ثابت ۰/۰۵ در نظر گرفته شده و یا از رابطهٔ سالبوی و وایت‌هاوس مقدار دقیق آن تعریف می‌گردد [25]:

$$\theta_{cr,n} = \frac{0.3}{1+1.2d_{*n}} + 0.055(1 - e^{-0.02d_{*n}}) \qquad (٨)$$

d_{*n} اندازه بی‌بعد n امین ذرّه رسوب است.

در این مدل پدیدهٔ فرسایش و رسوب‌گذاری هر دو پدیده‌های متقابل میکرو هستند که به‌صورت هم‌زمان رخ می‌دهند. ترکیب این دو پدیده به‌منظور بررسی تغییرات خالص بین رسوب بستر و رسوب معلّق انجام می‌گیرد. برای محاسبهٔ فرسایش بستر، سرعت بلند شدن و کنده شدن هر ذرّه رسوب از سطح بستر، $u_{Lift,n}$ که از سرعت برشی بحرانی بستر بیشتر است بر اساس معادلهٔ وینرپ و همکاران (۱۹۹۲) حاصل می‌شود:

$$u_{lift,n} = n_b\alpha_n d_{*,n}^{0.3}(\theta - \theta_{cr,n})^{1.5}\sqrt{gd_n(S_n - 1)} \qquad (٩)$$

α_n ضریب بلند شدن هر ذرّه رسوب و n_b بردار نرمال بر سطح بستر رسوبات است. در محاسبهٔ ته‌نشینی رسوبات، سرعت ته‌نشینی ارائه شده توسط سالبوی (۱۹۹۷) مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$u_{settle,n} = \frac{1}{g}\left[\left(10.36^2 + 1.049d_{*,n}^3\right)^{1/2} - 10.36\right]\frac{V_f}{d_n} \qquad (١٠)$$

که g شتاب ثقل و $u_{settle,n}$ هم‌راستا با شتاب ثقل در نظر گرفته می‌شود. فرم بی‌بعد معادلهٔ انتقال رسوب برای ذرّه رسوب *n* به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi_n = \frac{q_{b,n}}{[g(S_n - 1)d_n^3]^{\frac{1}{2}}} \qquad (١١)$$

$q_{b,n}$ نرخ انتقال رسوب حجمی به ازای واحد عرض بستر و Φ_n بر اساس معادلهٔ میرپیتر-مولر (١٩٨٤) محاسبه می‌شود [26]:

$$\Phi_n = B_n(\theta_n - \theta_{cr,n})^{1.5}c_{b,n} \qquad (١٢)$$

B_n ضریب بار بستر بوده و مقدار آن برای نرخ انتقال رسوب پایین بین ۵ تا ۵/۷، برای نرخ انتقال متوسط حدود ۸ و برای نرخ انتقال بالا برابر ۱۳ اختیار می‌گردد. $c_{b,n}$ جزء حجمی ذرّه رسوب *n* در بستر است. رابطهٔ ون-رایان (١٩٨٤) برای محاسبهٔ ضخامت لایهٔ رسوبی h_n مورد استفاده قرار می‌گیرد [27]:

$$h_n = 0.3 d_n d_{*,n}^{0.7} \left(\frac{\theta_n}{\theta_{cr,n}} - 1\right)^{0.5} \quad (۱۳)$$

هندسهٔ مدل

به‌منظور صحّت‌سنجی نتایج عددی، از نتایج تجربی ملویل (۱۹۷۵) استفاده گردیده و کانال مورد آزمایش در پژوهش ملویل با طول ٦ متر، عرض ۰/٤٥٦ متر و عمق جریان ۰/۱۵ متر شبیه‌سازی شده است. دبی جریان ۱۷/۱۲ لیتر بر ثانیه، میانگین سرعت جریان ۰/۲۵ متر بر ثانیه، قطر پایه استوانه‌ای ۵/۱ سانتی‌متر، متوسط قطر رسوبات بستر ۰/۳۸۵ میلی‌متر، زاویهٔ ایستائی ذرات رسوب ۳۲ درجه و چگال نسبی آن‌ها ۲/٦۸ است [6]. در مطالعهٔ عددی پایهٔ دایره‌ای در وسط کانال تعبیه شده است تا در این فاصله، جریان قبل از رسیدن به پایه به حالت توسعه‌یافته رسیده باشد.

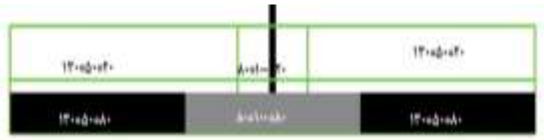
صحّت‌سنجی نتایج عددی

تعریف شرایط مرزی

در بلوک محاسباتی به‌طور جداگانه شرایط مرزی شش-گانه تعریف می‌گردد. برای دیواره‌ها شرط مرزی غیر لغزشی دیواره، برای ورودی کانال شرط مرزی فشار معیّن با اعمال تراز سطح آب و سرعت جریان در راستای x، شرط مرزی جریان خروجی برای خروجی کانال و برای سطح آزاد جریان شرط مرزی تقارن در نظر گرفته شده است.

بررسی اندازهٔ سلول‌های میدان محاسباتی

حساسیت‌های مدل عددی به شبکه‌بندی و انفصال میدان، همواره یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی عددی بوده است. برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌های مستطیلی شکل در نرم‌افزار Flow3D ارائه شده است که کلیهٔ اندازه‌های سازهٔ مورد نظر و فضای اشغال‌شده توسط سیّالات در داخل آن‌ها تعریف می‌شود. برای مدل عددی حاضر از یک بلوک شبکه‌بندی استفاده شده و تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف مورد آزمون واقع شده‌اند. در محدودهٔ اطراف پایه نیز به دلیل اینکه تمامی برجستگی‌های سازه توسط مدل عددی شناخته شوند و هیدرودینامیک مدل با دقّت بیشتری شبیه‌سازی گردد، نیاز به استفاده از شبکه‌بندی ریزتر است. تعداد سلول‌ها و استفاده از سلول‌های ریز در اطراف پایه در شکل (۱) نشان داده شده است.

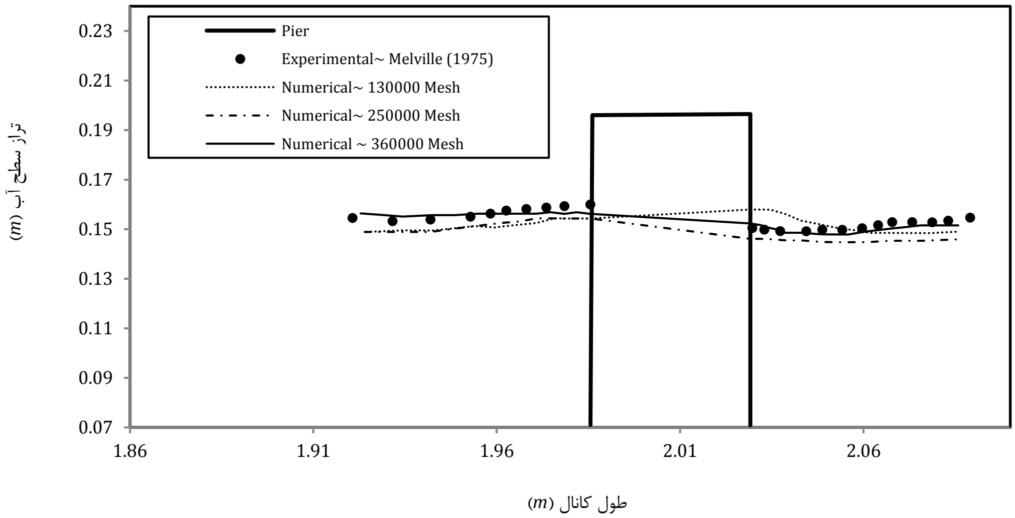


شکل (۱): تعداد سلول‌ها در نقاط مختلف شبکه‌بندی میدان محاسباتی

به‌منظور انتخاب تعداد سلول مناسب، مدل‌سازی تغییرات سطح آزاد آب در وسط کانال با استفاده از چهار تعداد مختلف سلول، با مقادیر ۱۳۰۰۰۰، ۲۵۰۰۰۰، ۳٦۰۰۰۰ و ٤۵۰۰۰۰ انجام یافته و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تجربی ملویل (۱۹۷۵) مقایسه شد (شکل ۲). در شبیه‌سازی حاضر مدل آشفتگی LES به‌کار برده شده است. در جدول (۱) ارتفاع محاسبه‌شده سطح آب توسط نرم‌افزار با داده‌های تجربی ملویل (۱۹۷۵) مقایسه شده و برای هرکدام از شبکه‌بندی‌ها، مقدار خطا در مقطع عرضی معیّن شده، محاسبه شده است. برای محاسبهٔ خطا از رابطهٔ زیر استفاده شده است:

$$R = \sum_{i=1}^{n} \left|\frac{Y_i - y_i}{Y_i}\right| \times 100 \quad (۱٤)$$

که در آن Y_i عمق تجربی سطح آب و y_i عمق جریان به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی است.



شکل (۲): مقایسهٔ نیمرخ طولی سطح آب محاسباتی با داده‌های تجربی ملویل (۱۹۷۵) برای تعداد سلول:
الف) ۱۳۰۰۰۰، ب) ۲۵۰۰۰۰، ج) ۳۶۰۰۰۰

جدول (۱): مقایسهٔ ارتفاع محاسباتی سطح آب با داده‌های تجربی ملویل (۱۹۷۵) برای شبکه‌های مختلف

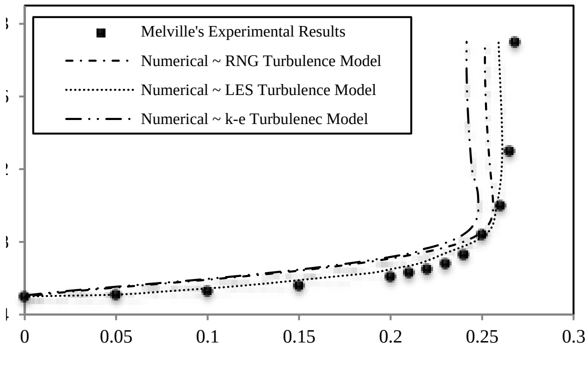
تعداد شبکه		خطای R (٪)
شبکه‌بندی درشت	۱۳۰۰۰۰	۱٤/۲۵۱
شبکه‌بندی متوسط	۲۵۰۰۰۰	۵/۹۰٤
شبکه‌بندی ریز	۳٦۰۰۰۰	۱/۹۰۸
شبکه‌بندی بسیار ریز	٤۵۰۰۰۰	۱/۸۷۳

از نتایج جدول فوق می‌توان دریافت خطای شبکه‌بندی درشت نسبت به دو شبکه‌بندی متوسط و ریز بسیار زیاد است که درنتیجه برای سایر شبیه‌سازی‌ها، از آن صرف‌نظر می‌شود. از طرفی میزان بهبود خطا در شبکه‌بندی ریز نسبت به شبکه‌بندی متوسط بسیار محسوس نیست.

این موضوع نشان می‌دهد با افزایش تعداد شبکه به مقداری بیش از آن و افزایش حجم سلول‌های محاسباتی، مقدار جواب مستقل از تعداد سلول‌ها باقی می‌ماند. پس تعداد ۳٦۰۰۰۰ سلول با اطمینان خوبی برای سایر مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

بررسی مدل‌های آشفتگی منحنی‌های سرعت جریان

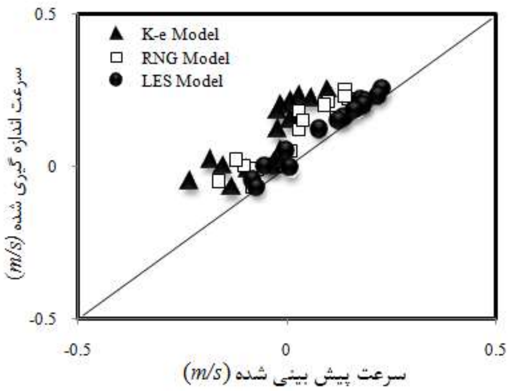
پس از انتخاب شبکه‌بندی مناسب، بررسی منحنی سرعت و الگوی جریان برای انتخاب مدل آشفتگی انجام شده است. در شبیه‌سازی عددی جریان‌های ثانویهٔ پیرامون پایه، اعمال اثر آشفتگی بسیار حائز اهمیّت است؛ ازاین‌رو سه مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد، RNG و LES انتخاب گردیده و مورد آزمون قرار گرفته‌اند. شکل (۳) مقایسهٔ نتایج عددی و تجربی منحنی‌های سرعت در صفحه XZ را نمایش می‌دهد. این منحنی‌ها در فاصلهٔ 5D در بالادست محل پایه در نظر گرفته شده‌اند که D قطر پایه است.



شکل (۳): مقایسهٔ منحنی‌های سرعت حاصل‌شده با سه مدل آشفتگی با منحنی سرعت مدل تجربی ملویل (۱۹۷۵)

برای منحنی به‌دست‌آمده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد، مقدار خطا برابر ۸/۱۰۹ درصد، با مدل آشفتگی RNG، برابر ٤/٥٦٤ درصد و با استفاده از مدل LES برابر ۱/۰۵۲ است. مشاهده می‌شود استفاده از مدل آشفتگی LES موجب نتایج دقیق‌تر شده و ازاین‌رو در سایر شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (٤) مقایسهٔ سرعت جریان محاسباتی با داده‌های تجربی ملویل را در نقاط مختلف بستر نمایش می‌دهد.

تطابق قابل قبول مقادیر محاسباتی و تجربی سرعت برای مدل آشفتگی LES تا اندازهٔ زیادی در شکل مشخص است. شبیه‌سازی دقیق جریان به‌ویژه در نزدیکی مرز پایه بسیار حائز اهمّیت است زیرا نقش قابل توجّهی در انتقال بار بستر و فرسایش بستر پیرامون پایه خواهد داشت.

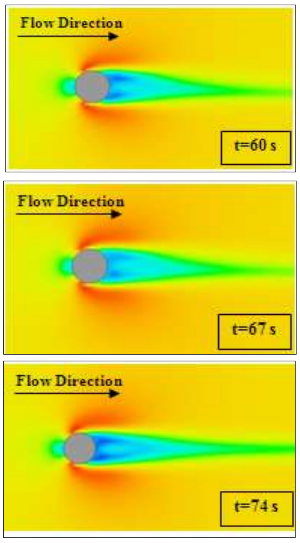


شکل (٤): مقایسهٔ مقادیر محاسباتی و تجربی سرعت در نقاط مختلف پیرامون پایه با استفاده از سه مدل آشفتگی

بررسی الگوی جریان

برای ارزیابی بیشتر مدل‌های آشفتگی در نرم‌افزار Flow3D، کانتورهای سرعت جریان و گردابه‌های برخاستگی ناحیهٔ دنبالهٔ پایه مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. شکل (٥) کانتورهای به‌دست‌آمده با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ را در تراز بستر نمایش می‌دهد. برای بررسی تناوب گردابه‌ها، اجرای مدل تا ۸۰ ثانیه به طول انجامیده است.

در شکل (٦) گردابه به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ نشان داده شده است. در اعداد رینولدز بسیار کوچک ($R< 2$) جریان اطراف پایه‌ها کاملاً به پایه چسبیده و جدایش جریان از مرزهای پایه رخ نمی‌دهد.



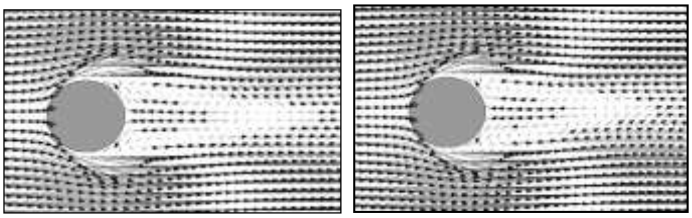
شکل (٥): کنتورهای سرعت جریان در راستای طولی با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ در بازه‌های زمانی ۷ ثانیه‌ای

با افزایش عدد رینولدز، جریان از لبه‌های پایهٔ جدا شده و یک جفت گردابه متقارن در پشت پایه به وجود می‌آید. با افزایش عدد رینولدز، گردابه‌های متقارن پشت پایه از حالت دائم خارج شده و به‌صورت نوسانی درآمده و به‌طور متناوب در جریان پخش می‌شوند. در این مدل، عدد رینولدز برای جریان عبوری از اطراف پایه، برابر $Re=۳۵\times۱۰^{۳}$ است که با توجّه به بالا بودن عدد رینولدز، تشکیل گردابه‌های متقارن و عدم پخش آن‌ها در جریان منطقی نیست. مشاهده می‌گردد که در زمان‌های ٦۰ و ٧٦

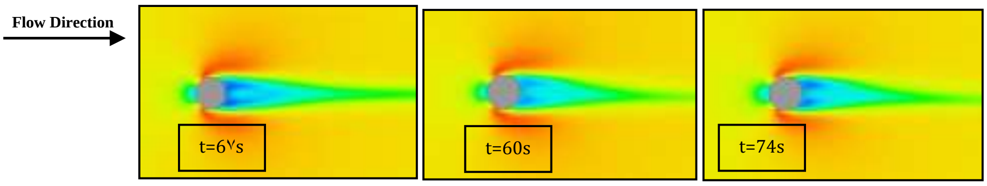
ثانیه، گردابه‌های برخاستگی کاملاً متقارن باقی‌مانده و نوسان گردابه در آن‌ها رخ نمی‌دهد.

حالت متقارن گردابه‌ها و عدم پخش آن‌ها در جریان، نشان می‌دهد این مدل آشفتگی نمی‌تواند شکست گردابه‌ها در پشت پایه را به‌درستی شبیه‌سازی نماید. شکل (۷) کانتورهای سرعت جریان در تراز بستر و گردابه‌های جریان شبیه‌سازی‌شده با مدل آشفتگی RNG را نمایش می‌دهد.

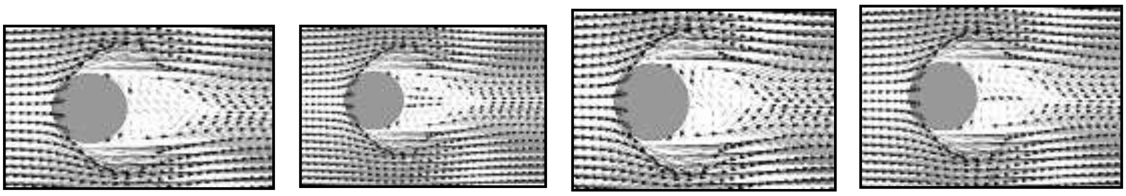
در این مدل نیز تغییر قابل توجّهی در کانتورهای سرعت نسبت به مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ حاصل نشده است، لیکن نوسان گردابه‌ها در پشت پایه، در مقایسه با شکل (٦) محسوس است. در مدل‌سازی عددی با مدل آشفتگی RNG، گردابه‌ها در زمان ۱۰ و ۲۰ ثانیه حالت متقارن دارند. در زمان ٦۷ ثانیه، حالت متقارن گردابه‌ها حذف گردیده و رشد و گسترش گردابه‌ها در کناره‌های پایه مشاهده می‌گردد، ابعاد گردابه‌ها در زمان ۷٤ ثانیه نسبت به زمان ٦۷ ثانیه کاهش یافته است لیکن در وجوه جانبی پایه نوسانی مشاهده نمی‌گردد. همچنین فرآیند انتشار گردابه‌ها نیز درست نبوده و ناحیهٔ برخاستگی گردابه‌ها تنها به فاصلهٔ کمی از پایین‌دست پایه محدود شده است.



شکل (٦): فرم متقارن گردابه برخاستگی در ناحیهٔ دنبالهٔ جریان شبیه‌سازی‌شده با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$



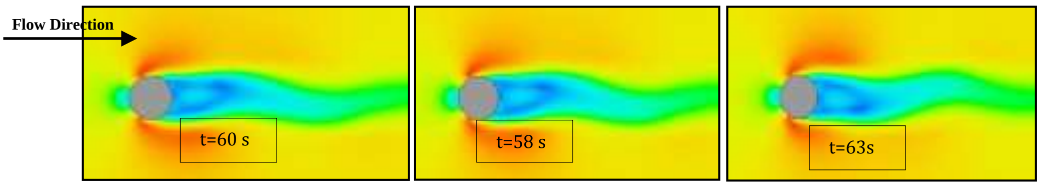
(الف)



٦۰ ثانیه ٤۰ ثانیه ۲۰ ثانیه ۱۰ ثانیه

(ب)

شکل (۷): (الف) کانتورهای سرعت جریان شبیه‌سازی‌شده و (ب) گردابه برخاستگی در ناحیهٔ دنبالهٔ جریان با مدل آشفتگی RNG در زمان‌های مختلف



شکل (۸): کانتورهای سرعت جریان شبیه‌سازی‌شده با مدل آشفتگی LES

در شکل (۸) کانتورهای سرعت جریان در تراز بستر و یک سیکل شماتیک از مراحل ایجاد، رشد و پخش گردابه‌های برخاستگی با به‌کارگیری مدل آشفتگی LES نشان داده شده است.

شکل بالا نشان می‌دهد گردابه‌ها در مدل آشفته LES به‌صورت نوسانی شبیه‌سازی شده و وقوع پدیدهٔ رهایی متناوب گردابه‌ها مشاهده می‌گردد. در فاز ۱ نوسان، گردابه کوچکی در وجه بالایی پایه ایجاد شده و گردابه بزرگ وجه پایینی از مرز پایه جدا شده و در حال پخش در جریان است. در فاز ۲ و با گذشت ۲ ثانیه از فاز ۱، گردابه کوچک بالایی رشد یافته و در حال پخش به سمت پایین‌دست است. هم‌زمان با رشد و انتشار گردابه بالایی به پایین‌دست، گردابه کوچکی در وجه پایینی در حال رشد کردن بوده تا اینکه به بیشینه توان خود برسد. در فاز ۳، گردابه بزرگ بالایی کاملاً پخش شده و گردابه پایینی رشد پیدا کرده است. در فاز ٤، گردابه پایینی پس از رشد به سمت پایین در حال انتشار بوده و گردابه بالایی در حال تشکیل است. درنهایت در فاز ۵ و پس از گذشت ۷ ثانیه، الگوی یکسانی از رشد و گسترش گردابه‌ها (در فاز ۱) مشاهده می‌گردد. فرکانس نوسان این گردابه‌ها (f)، در حدود ۰/۸۹۷ هرتز است. با شروع پدیده نوسان گردابه‌ها، نیروهای نوسانی برآ و پسا از طرف جریان بر پایه وارد می‌گردد، ماهیّت نوسانی این نیروها به‌گونه‌ای است که می‌توان عملکرد این نیروها را در یک سیکل کامل ۷ ثانیه‌ای (دورهٔ تناوب T) منطبق بر سیکل نوسان گردابه‌ها در نظر گرفت.

یکی دیگر از مشخصه‌های جریان غیردائمی، عدد استروهال جریان است. در پدیدهٔ رهایی متناوب گردابه‌ها، عدد استروهال به‌عنوان اندازه فرکانس بی‌بعد پدیدهٔ شکست گردابه در نظر گرفته می‌شود. عدد استروهال به‌صورت $St = fD/U$ تعریف می‌شود که St عدد استروهال، f فرکانس گردابه‌ها، D قطر استوانه و U سرعت جریان است. عدد استروهال به عدد رینولدز جریان و تعداد شبکه بسیار حساس بوده و با تغییر در مقدار آن‌ها، دچار تغییر می‌گردد. طبق نتایج عبداللهی و عاطفی (۱۳۹۰)، در محدودهٔ ۱۵۰<Re <۳۵۰، حساسیت نتایج محاسبات به نوع شبکه‌بندی وجود دارد اما با افزایش عدد رینولدز و در محدودهٔ Re >۳۵۰، عدد استروهال مستقل از تعداد سلول‌های شبکه باقی می‌ماند. علّت تأثیر قابل توجّه نوع شبکه‌بندی بر نتایج مربوط به عدد استروهال در محدوده ۱۵۰<Re <۳۵۰ را می‌توان به تغییر الگوی جریان و نفوذ جریان‌های گردابه‌ای از پایین-دست پایه به سمت لبه‌های جلویی، مربوط دانست [۲۸]. در این پژوهش، با توجّه به بالا بودن عدد رینولدز جریان (۳۵×۱۰^۳)، عدد استروهال مستقل از عدد رینولدز و تعداد سلول‌های شبکه است. مقایسهٔ فرکانس نوسان جریان گردابه‌ای و عدد استروهال برای نتایج تجربی ملویل و نتایج عددی حاضر در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): مقایسهٔ مقادیر تجربی و عددی پارامترهای هیدرودینامیکی جریان

پارامتر	نماد	تجربی	عددی
دوره تناوب (ثانیه)	T	٦/۳۷	۷
فرکانس (هرتز)	f	۰/۹۸۵	۰/۸۹۷
عدد استروهال	St	۰/۲	۰/۱۸۳

عمق آب‌شستگی بستر

عمق آب‌شستگی یک ساعت اول با توجّه به نتایج تجربی ملویل (۱۹۷۵) صحّت‌سنجی شده و سپس بدون تغییر در پارامترهای رسوب مدل عددی، سایر مدل‌سازی‌ها انجام یافته‌اند. پارامتر شیلدز بحرانی، ضریب دراگ، ضریب انتقال ذرات، ضریب بار بستر و زاویهٔ ایستایی از مهم‌ترین پارامترهای رسوب به شمار می‌روند که باید در تنظیمات اوّلیهٔ مقدار صحیح آن‌ها از طریق سعی و خطا مشخص گردد. محدودهٔ مناسب برای عدد شیلدز بحرانی 0/02~0/1 است که بر حسب نمودار شیلدز، مقدار آن برابر ۰/۰۳٤ به‌دست‌آمده است. مقدار ضریب دراگ برابر ۰/۵ برای ذرات کروی است. انگلاند و هانسون در سال

۱۹۶۷ پیشنهاد کردند که برای شن و ماسه، مقدار ۱/۵ مناسب است و سایر مقادیر معمول آزمایشگاهی بین ۰/۷۵ تا ۱/۵ است. در این بررسی، مقدار ضریب دراگ برابر ۱/۲ وارد شده است. ضریب بار بستر که در رابطهٔ میرپیتر-مولر وجود دارد نرخ انتقال بار بستر به ازای تنش برشی بیش از تنش برشی بحرانی است. مقدار این ضریب بین ۵ تا ۱۳ است؛ به‌طوری‌که مقدار ۵ برای شدّت انتقال پایین و مقدار ۱۳ برای شدّت بالای انتقال ماسه تعریف می‌شود. پس از بررسی مقادیر مختلف، مقدار ۸ برای این ضریب تعیین شده است. یکی از پارامترهای مهم در مدل آب‌شستگی-رسوب، زاویهٔ ایستایی ذرات رسوب است. این پارامتر برای مدل صحّت‌سنجی ملویل برابر مقدار آزمایشگاهی آن یعنی ۳۲ درجه وارد شده است.

در مطالعه آزمایشگاهی ملویل، مقدار عمق آب‌شستگی تعادلی برای مدل مبنا برابر ۱۵ سانتی‌متر و عمق آب‌شستگی ۱ ساعته معادل ۸ سانتی‌متر است. در جدول (۳) مقایسهٔ داده‌های تجربی و نتایج عددی ارائه شده است. مقدار خطا در شبیه‌سازی یک‌ساعته برابر ٥/٤ درصد به‌دست‌آمده است. این موضوع نشان‌دهندهٔ تطابق قابل قبول مقادیر عددی و مقادیر تجربی ملویل است.

برای بررسی و مقایسه کامل‌تر نتایج تجربی و عددی، از رابطهٔ ارائه شده توسط ملویل و چیو (۱۹۹۹) استفاده شده است. رابطهٔ تجربی ملویل و چیو (۱۹۹۹۹) به شکل زیر است [29]:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp\left\{-0.03\left|\frac{V_c}{V}\ln\left(\frac{t}{t_e}\right)\right|^{1.6}\right\} \qquad (۱۵)$$

که زمان تعادل از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

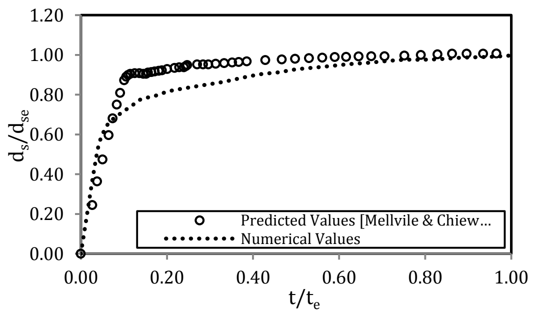
$$t_e(\text{days}) = \begin{cases} 30.89\frac{D}{U}\left(\frac{U}{U_c}\right)\left(\frac{y}{D}\right)^{0.25} & \frac{y}{D} \geq 6 \\ 48.26\frac{D}{U}\left(\frac{U}{U_c} - 0.4\right) & \frac{y}{D} < 6 \end{cases}$$

(۱٦)

جدول (۳): مقایسهٔ مقادیر تجربی و عددی عمق فرسایش در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای

زمان (دقیقه)	عمق آب‌شستگی (cm)	
	عددی	تجربی
۵	۰/۹۱	۱
۱۰	۱/۳۷	۱/۵
۱۵	۱/٤۷	۱/٦۰
۲۰	۱/٦٦	۱/۸۰
۲۵	۲/٦۱	۲/۸
۳۰	۳	۳/۲
۳۵	۳/۷۰	۳/۹
٤۰	٤/۰۱	٤/۲
٤۵	۵/۵۸	۵/۸
۵۰	٦/٤٤	٦/٦۰
۵۵	۷/۲۸	۷/٤
٦۰	۷/۹۲	۸
خطای متوسط کل (٪)		۵/٤٤

در شکل (۹) مقایسه نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی و نیز داده‌های به‌دست‌آمده از رابطهٔ (۱۵) نمایش داده شده است.



شکل (۹): مقایسهٔ داده‌های حاصل از رابطهٔ ملویل و چیو (۱۹۹۹) و نتایج عددی

مدل پایه‌ها

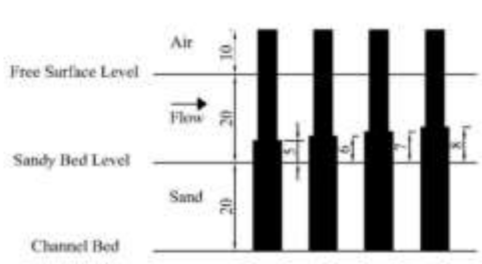
پس از اطمینان از صحّت نتایج هیدرودینامیکی و رسوبی، سایر مدل‌های انتخابی مورد بررسی قرار می‌گیرند. مدل‌های پیشنهادی در چهار گروه کلّی طبقه‌بندی می‌شوند.

گروه اوّل (A) پایه‌های با مقاطع هندسی مختلف (دایره-ای، مستطیلی گرد گوشه، بیضی و عدسی) و گروه دوم (B) پایه‌های سکویی با چهار ارتفاع ۵، ٦، ۷ و ۸ سانتی‌متر برای ارتفاع سکو را شامل می‌شوند. این اعداد از بررسی پیشنهاد پژوهشگران مختلف انتخاب شده است. در گروه سوم (گروه C)، مدل مرکب سکو و مقطع هندسی پایه و در گروه (D)، ترکیب مدل‌های گروه (C) با شکاف بررسی شده است. در تمامی مدل‌ها، پایهٔ استوانه‌ای با مقطع دایره به‌عنوان مدل مبنا بوده و بیشینهٔ فرسایش ۱ ساعته بستر در بالادست مدل‌ها، به دست آمده است. پایه‌های مورد بررسی دارای عرض ٤ سانتی‌متر، نسبت طول به عرض ۳، متوسط قطر رسوبات ۰/۷۲ میلی‌متر، سرعت جریان ۰/۳۲۵ متر بر ثانیه، عمق جریان ۲۰ سانتی‌متر، زاویهٔ ایستائی ذرات ۳۲ درجه و چگالی نسبی ذرات ۲/٦۷ است.

گروه اوّل، شامل مقاطع هندسی دایره، مستطیل گرد گوشه، بیضی و عدسی است (شکل ۱۰–الف). در گروه دوم، پایه‌های سکویی دارای سکویی به قطر ٦ سانتی‌متر بوده (از هر طرف ۱ سانتی‌متر بیرون آمدگی) و ارتفاع ۵، ٦، ۷ و ۸ سانتی‌متر نسبت به تراز بستر می‌باشند (شکل ۱۰–ب). در پایه‌های شکاف‌دار نیز عرض شکاف ۲ سانتی‌متر و ارتفاع آن با توجّه به ارتفاع سکو در بالای تراز بستر تعیین شده است (شکل ۱۰–پ). در جدول (٤) و شکل (۱۱) جزئیات مدل پایه‌ها ارائه گردیده است.



(الف)

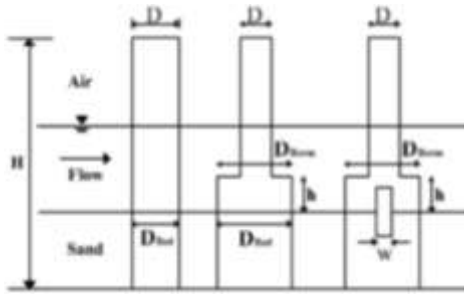


(ب)



(پ)

شکل (۱۰): (الف) مدل‌های گروه A، (ب) مدل‌های سکویی گروه B، (پ) مدل پایه‌های شکاف‌دار گروه D



شکل (۱۱): ابعاد مدل پایه‌ها

در شبیه‌سازی این گروه از مدل‌ها، تعداد سلول‌های شبکه ۳٦۰۰۰۰، مدل آشفتگی LES و زاویهٔ ایستائی ذرات ۳۲ درجه در نظر گرفته شده است.

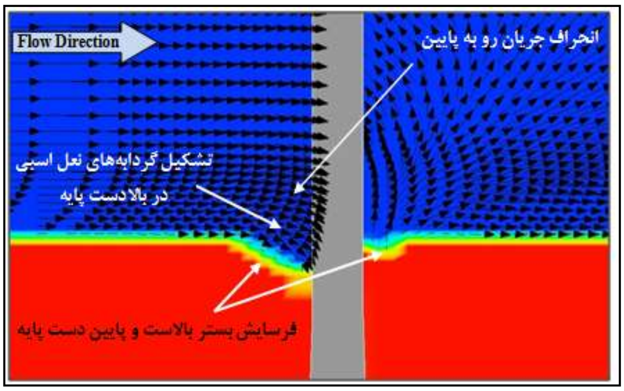
نتایج و بحث

مدل مبنا

در شکل (۱۲) فرسایش بستر و بردارهای سرعت جریان پیرامون مدل مبنا نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود جریان نزدیک شونده پس از برخورد به پایه به سمت بستر منحرف شده و جت جریان در مجاورت آن تشکیل شده است. با برخورد جت جریان به بستر بالادست، گردابه‌های نعل‌اسبی تشکیل شده و در پایین‌دست پایه نیز بازگشت جریان و تشکیل گردابه‌های برخاستگی مشاهده می‌گردد.

برای مدل مبنا، بیشینهٔ عمق آب‌شستگی یک‌ساعته برابر ۲۹ میلی‌متر است. برای محاسبهٔ درصد کاهش آب‌شستگی مدل‌های پیشنهادی، رابطهٔ $r_{de} = (d_{s_o} - d_s)/d_{s_o}$ به کار برده شده است؛ که d_{s_o} بیشینهٔ عمق آب‌شستگی پایه مبنا و d_s بیشینهٔ عمق آب‌شستگی مدل‌های مورد بررسی است.



شکل (۱۲): فرسایش بستر بالادست و پایین‌دست پایه به همراه تشکیل گردابه‌های نعل‌اسبی و برخاستگی

جدول (٤): مشخصات مدل پایه‌های پل

گروه	شماره مدل	نام اختصاری مدل	مدل پایه	D (cm)	D_{Bed} (cm)	D_{Berm} (cm)	h (cm)	W (cm)	t (s)
مدل مبنا	۱	C	دایره‌ای	٤	٤	--	--	--	۳٦۰۰
A	۲	R	مستطیلی گرد گوشه	٤	٤	--	--	--	۳٦۰۰
	۳	E	بیضی	٤	٤	--	--	--	۳٦۰۰
	٤	L	عدسی	٤	٤	--	--	--	۳٦۰۰
B	٥	CB1	دایره‌ای با سکوی ٥ سانتی‌متری	٤	٦	٦	٥	--	۳٦۰۰
	٦	CB2	دایره‌ای با سکوی ٦ سانتی‌متری	٤	٦	٦	٦	--	۳٦۰۰
	۷	CB3	دایره‌ای با سکوی ۷ سانتی‌متری	٤	٦	٦	۷	--	۳٦۰۰
	۸	CB4	دایره‌ای با سکوی ۸ سانتی‌متری	٤	٦	٦	۸	--	۳٦۰۰
C	۹	RB	مستطیلی گرد گوشه با سکو	٤	٦	٦	؟	--	۳٦۰۰
	۱۰	EB	بیضی با سکو	٤	٦	٦	؟	--	۳٦۰۰
	۱۱	LB	عدسی با سکو	٤	٦	٦	؟	--	۳٦۰۰
D	۱۲	CBS	دایره‌ای با سکو و شکاف میانی	٤	٦	٦	٦	۲	۳٦۰۰
	۱۳	RBS	مستطیلی گرد گوشه با سکو و شکاف میانی	٤	٦	٦	٦	۲	۳٦۰۰
	۱٤	EBS	بیضی با سکو و شکاف میانی	٤	٦	٦	٦	۲	۳٦۰۰
	۱٥	LBS	عدسی با سکو و شکاف میانی	٤	٦	٦	٦	۲	۳٦۰۰

مدل‌های گروه A

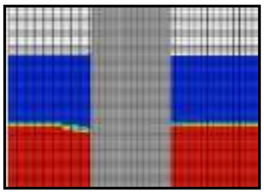
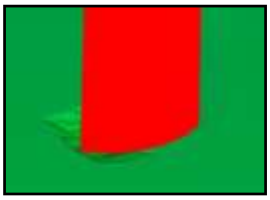
آشفتگی در آرایش خطوط جریان در پایه‌های با دماغهٔ تیز و آیرودینامیک کمتر از حالت دماغهٔ پهن بوده و شکل پایه تأثیر قابل ملاحظه‌ای در حذف گردابه‌های نعل‌اسبی و برخاستگی پیرامون پایه دارد. در این راستا سه شکل پایه مستطیلی گرد گوشه، بیضی و عدسی که به ترتیب میزان انطباق آن‌ها با الگوی جریان بیشتر شده بررسی شده‌اند. در جدول (۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی یک‌ساعته برای مدل‌های گروه A ارائه شده است.

جدول (۵): حداکثر عمق آب‌شستگی مدل پایه‌های گروه A

مدل پایه	D (mm)	D_{Bed} (mm)	d_s (mm)	d_s/D_{Bed}	r_{de} (%)
C	٤٠	٤٠	۲۹	۰/۷۲٥	---
R	٤٠	٤٠	۲۱	۰/۳۷٥	۲۷
E	٤٠	٤٠	۱٦	۰/۲۲٥	٤٤
L	٤٠	٤٠	۱۲	۰/۱۲٥	٥۸

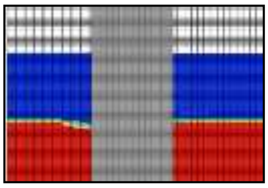
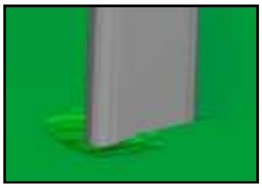
در شکل (۱۳) و (۱٤) نمایی دوبعدی و سه‌بعدی از فرسایش بستر پایه‌های با مقطع مستطیلی گردگوشه و عدسی نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها معلوم است فرسایش بستر اطراف مدل L بسیار کمتر از مدل R است.

با استفاده از مقطع هندسی عدسی، آب‌شستگی تا ٥۸٪، در مقطع بیضی تا ٤٤٪ و با مقطع مستطیل گرد گوشه، آب‌شستگی تا ۲۷٪ کاهش یافته است. این کاهش نشان می‌دهد مقطع عدسی بهتر از سایر مقاطع عمل کرده و تأثیر بیشتری در کنترل فرسایش بستر داشته است. تأثیر مقطع بیضی نیز در کاهش آب‌شستگی قابل ملاحظه است. در مقطع عدسی به دلیل انطباق زیاد مقطع با الگوی جریان، الگوی جریان کمتر دستخوش تغییر شده و جداشدگی جریان تنها محدود به یک نقطه می‌گردد؛ بنابراین جداشدگی جریان از پایه حذف گردیده و احتمال تشکیل گردابه‌های نعل‌اسبی نیز در بالادست پایه ضعیف می‌گردد. درنتیجه با تضعیف پارامترهای عامل آب‌شستگی (جدایش جریان و جت جریان رو به پایین) به میزان قابل توجّهی از شدّت آب‌شستگی کاسته می‌گردد.

(الف) (ب)

شکل (۱۳): فرسایش بستر پیرامون مدل L

(الف) (ب)

شکل (١٤): فرسایش بستر پیرامون مدل R

شکل (۱٥) تغییرات آب‌شستگی یک‌ساعته بیشینه را برای مدل‌های گروه A نشان می‌دهد. در مدل‌های C و R تغییرات فرسایش بستر در انتهای یک ساعت قابل ملاحظه است؛ لیکن در مدل‌های E و L تمایل برای رسیدن به تعادل در زمان یک ساعت مشاهده می‌شود. به عبارتی نمودار فرسایش در این مدل‌ها سریع‌تر به مجانب افقی میل کرده و تغییرات فرسایش بستر در این مدل‌ها تنها در لحظات اوّلیه قابل ملاحظه است.

مدل‌های گروه B

در شکل (١٦) تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی برای مدل پایه‌های گروه B در بازهٔ زمانی ۱ ساعته نمایش داده شده است. نتایج حاصل‌شده نیز در جدول (٦) ارائه گردیده است.

نتایج مدل عددی نشان می‌دهد پایهٔ سکویی ٦ سانتی‌متری با کاهش r_{de}=46% بیشترین تأثیر را در کاهش فرسایش بستر داشته است. این سکوی در بالادست پایه،

مانع از برخورد جت جریان به بستر بالادست پایه می‌گردد. مشهود است که با افزایش ارتفاع سکو از نقش محافظتی آن کاسته می‌گردد طوری که کاهش ۱۲ درصدی عمق آب‌شستگی مربوط به مدل سکویی ۸ سانتی‌متری است.

جدول (٦): درصد کاهش عمق آب‌شستگی در مدل پایه‌های گروه B

مدل پایه	D (mm)	D_{Bed} (mm)	d_s (mm)	d_s/D_{Bed}	r_{de} (%)
C	٤٠	٤٠	۲۹	۰/۷۲۵	---
CB1	٤٠	٦٠	۲۰/۲	۰/۵۰۵	۳۰
CB2	٤٠	٦٠	۱۵/٦	۰/۳۹	٤٦
CB3	٤٠	٦٠	۲۳	۰/۵۷۵	۲۱
CB4	٤٠	٦٠	۲۵/۷	۰/٦٤۲	۱۲

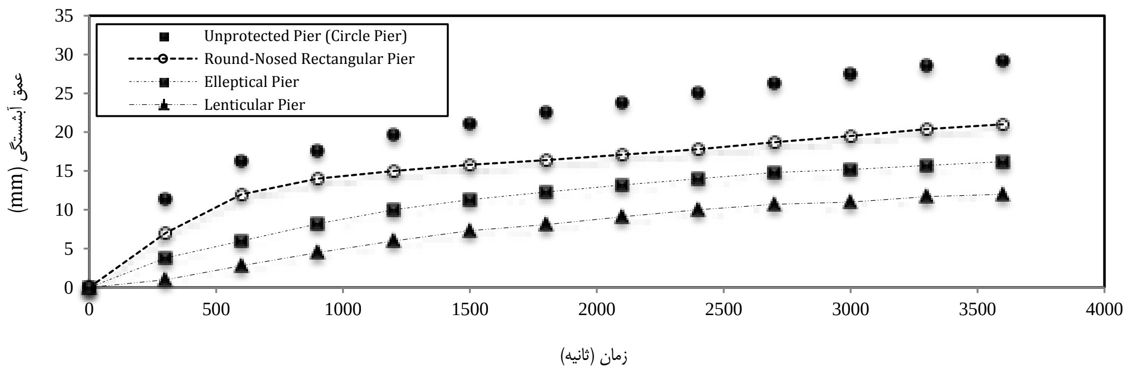
در استفاده از ابزار سکو، تنها قسمتی از جریان رو به پایین در بالای سکو حذف گردیده و جریان رو به پایین در مقطع سکو دوباره به بستر بالادست برخورد کرده و باعث تشدید آب‌شستگی می‌گردد. با افزایش ارتفاع سکو بر شدّت جت جریان رو به پایین در بالادست آن افزوده می‌شود. همچنین با بالا رفتن ارتفاع سکو، درصد مساحت انسداد افزایش یافته و بدین ترتیب از عملکرد اصلی سکو کاسته می‌شود. در مدل‌های CB3 و CB4 تمایل به برقراری تعادل در شرایط فرسایش دیده نمی‌شود؛ اما در دو مدل سکویی ۵ و ٦ سانتی‌متری مجانب افقی در زمان ۳٦۰۰ ثانیه قابل مشاهده است. فرسایش بستر پیرامون مدل CB2 در شکل (۱۷) نشان داده شده است.

مدل‌های گروه C

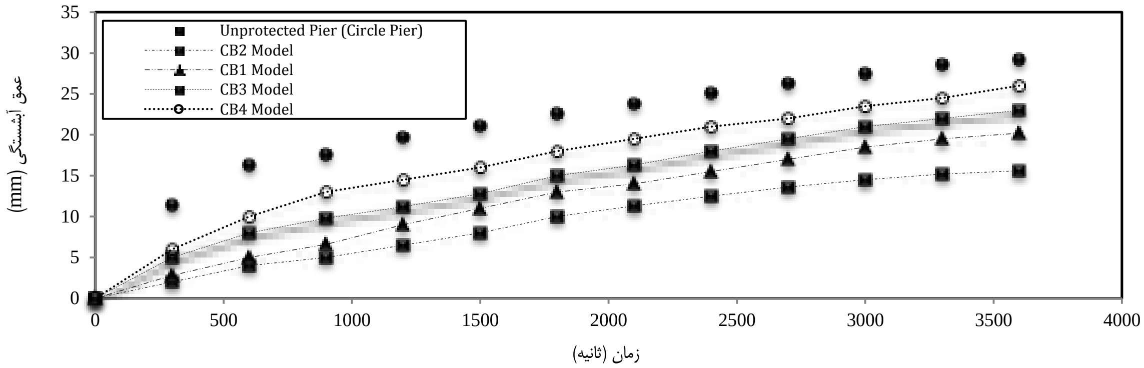
شکل (۱۸) تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی برای مدل‌های گروه C را نمایش می‌دهد. بر حسب نتایج، ارتفاع مؤثر سکو ٦ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. ترکیب مقطع هندسی با سکو به‌منظور بررسی میزان تأثیر هرکدام از پارامترهای آب‌شستگی، جدایش جریان و جریان رو به پایین؛ بوده است. جدول (۷) مقایسهٔ کمّی بیشینهٔ عمق آب‌شستگی را نشان می‌دهد.

جدول (۷): درصد کاهش عمق آب‌شستگی در مدل پایه‌های گروه C

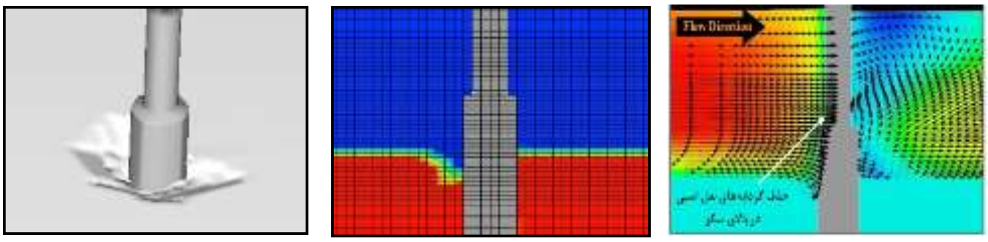
مدل پایه	D (mm)	D_{Bed} (mm)	d_s (mm)	d_s/D_{Bed}	r_{de} (%)
C	٤٠	٤٠	۲۹	۰/۷۲۵	---
CB	٤٠	٦٠	۱۵/۵	۰/۲۵۸	٤٦
RB	٤٠	٦٠	۲٦	۰/٤۳۳	۱۰
EB	٤٠	٦٠	۱۸/۳	۰/۳۰۵	۳۷
LB	٤٠	٦٠	۱۱	۰/۱۸۳	٦۲



شکل (۱۵): تغییرات زمانی بیشینهٔ عمق آب‌شستگی در مدل‌های گروه A



شکل (۱٦): تغییرات زمانی بیشینهٔ عمق آب‌شستگی برای مدل پایه‌های گروه B



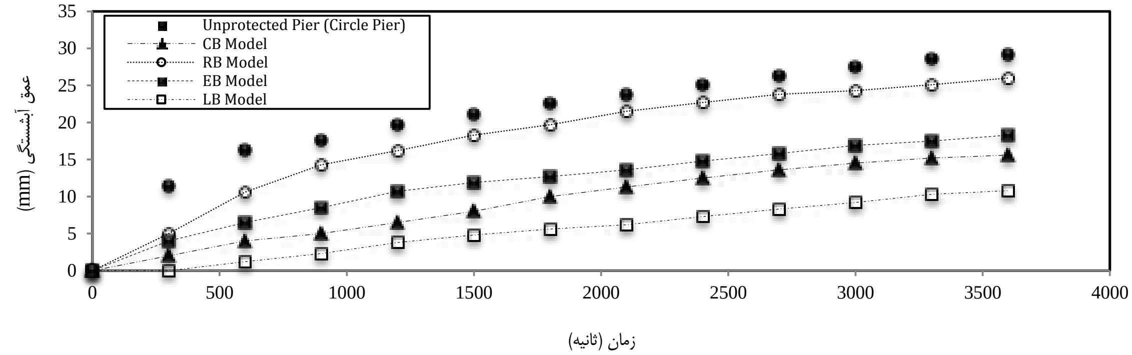
(پ) (ب) (الف)

شکل (۱۷): فرسایش بستر پیرامون مدل پایهٔ CB2 (الف) بردارهای سرعت جریان در پیرامون پایهٔ سکویی (ب) فرسایش یک‌ساعته بستر پیرامون پایهٔ سکویی (پ) نمایی سه‌بعدی از آب‌شستگی اطراف مدل

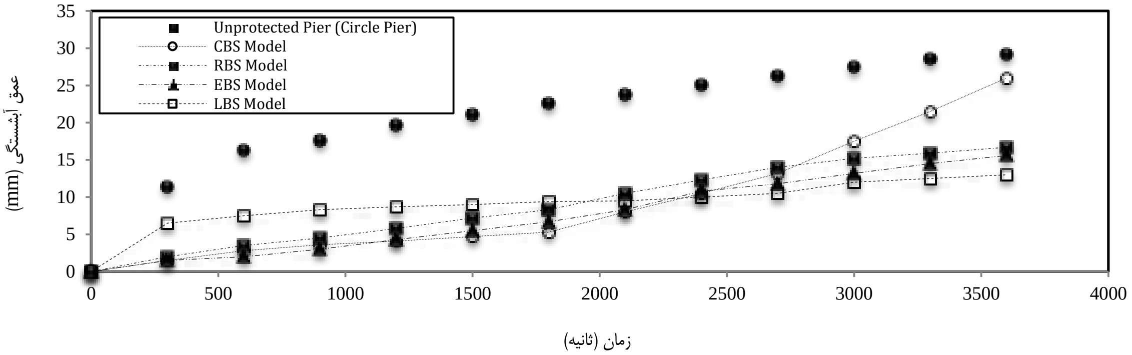
با افزایش قطر پایه در مقطعی از آن، عرض پایه در محل بستر افزایش می‌یابد که درنهایت موجب ازدیاد عرض انسداد می‌شود. ایجاد سکو و ازدیاد عرض انسداد در مدل‌های R و E، موجب افزایش عمق آب‌شستگی در مدل‌های RB و EB شده است. در مدل L نیز تأثیر سکو تنها کاهش ۱ میلی‌متری عمق فرسایش بوده است. اگرچه افزایش قطر پایه در نزدیکی بستر مانع برخورد جت جریان به بستر می‌گردد؛ لیکن افزایش قطر باعث تشدید جدایش جریان در کناره‌های پایه شده و بر شدّت آب‌شستگی می‌افزاید.

مدل‌های گروه D

هدف استفاده از شکاف میانی، منحرف نمودن جریان رو به پایین در مقطع بالادست پایه و کاهش عرض انسداد است. عرض، ارتفاع و محل قرارگیری شکاف و طولی از شکاف که درون بستر رودخانه قرار می‌گیرد عوامل مهم در شکاف پایهٔ پلها هستند. در این تحقیق عرض شکاف مطابق با پیشنهادهای پژوهشگران مختلف، برابر با ۲۵ درصد قطر پایه و ارتفاع آن یک برابر قطر پایه انتخاب شده است که عرض شکاف برابر ۲ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۵ سانتی‌متر بالای بستر است. شکاف‌ها در زیر تراز بستر نیز امتداد یافته‌اند. با توجّه به این‌که ارتفاع مؤثر سکو در مدل‌های گروه B، ٦ سانتی‌متر تعیین شده است، ارتفاع شکاف ۱ سانتی‌متر کوچک‌تر از ارتفاع سکو در نظر گرفته می‌شود. مقایسه شماتیک تغییرات بیشینهٔ عمق آب‌شستگی برای مدل‌های گروه D در شکل (۱۹) ارائه شده است.



شکل (۱۸): تغییرات زمانی بیشینهٔ عمق آب‌شستگی برای مدل پایه‌های گروه C



شکل (۱۹): تغییرات بیشینهٔ عمق آب‌شستگی برای مدل‌های گروه D

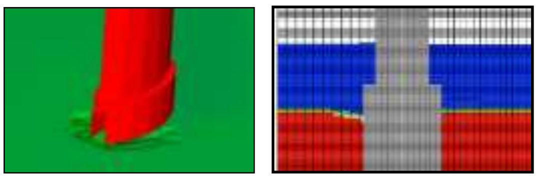
در لحظات آغازین شبیه‌سازی، عمق آب‌شستگی مدل‌های RB، EB و LB دارای تغییرات قابل توجّهی است لیکن پس از گذشت زمان ۲۵۰۰ ثانیه این تغییرات کاهش می‌یابد تا اینکه درنهایت به حالت تعادل برسد. در مدل پایه‌های شکاف‌دار تغییرات اوّلیه در عمق آب‌شستگی بسیار بیشتر از تغییرات عمق آب‌شستگی در مدل پایه‌های گروه A، B و C است که نشان می‌دهد مدّت زمان لازم برای رسیدن به شرایط تعادل در مدل‌های شکاف‌دار بیش از سایر مدل‌ها بوده و زمان بیشتری برای شبیه‌سازی نیاز است.

اعمال بازشدگی در مدل C تغییر قابل توجّهی در عمق آب‌شستگی ایجاد نکرده است. تأثیر مثبت شکاف در کاهش فرسایش بستر، تنها در لحظات اوّلیه شبیه‌سازی دیده می‌شود لیکن با گذشت زمان (۲۷۵۰ ثانیه)، رسوبات فرسایش یافته از کناره‌های پایه (ناشی از جدایش جریان) به سمت پایین‌دست کشیده شده و در پشت پایه تجمع می‌یابند. تجمع رسوبات موجب گرفتگی شکاف شده و باعث می‌شود مدل CB در بلندمدّت رفتاری همانند مدل C داشته باشد. بیشینهٔ عمق آب‌شستگی برای مدل CB حدود ۲۷ میلی‌متر است که اندکی کمتر از بیشینهٔ عمق آب‌شستگی مدل C است. انسداد شکاف در مدل‌های RB، EB و LB مشاهده نمی‌شود. در این مدل‌ها، بزرگ بودن نسبت طول به عرض پایه موجب می‌شود تا با کاهش سرعت جریان در کناره‌های پایه، رسوبات برخاسته در کناره‌های مدل‌ها ته‌نشین شده و به سمت پایین‌دست جابه‌جا نشوند؛ بنابراین شکاف ابزار مناسبی برای کاهش فرسایش بستر در پایه‌هایی است که نسبت طول به عرض آن‌ها بزرگ‌تر از ۱ باشد. عمق فرسایش در مدل RBS، ۱٤/٥ میلی‌متر به دست آمده است که برابر ۵۰ درصد کاهش نسبت به مدل مبنا و ۳۱ درصد کاهش

نسبت به مدل R است.

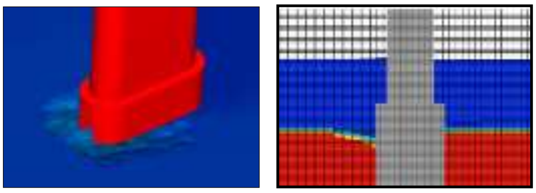
به عبارتی ترکیب مقطع مستطیلی گرد گوشه با سکو و شکاف باعث کاهش عمق آب‌شستگی به میزان ۱۳/۵ میلی‌متر شده است. در مدل EBS، کاهش بیشینهٔ عمق آب‌شستگی نسبت به مدل مبنا و مدل E، به ترتیب برابر ٤٨ درصد و ٦ درصد است. اعمال سکو و شکاف در مدل L تنها موجب کاهش ۱ میلی‌متر در بیشینهٔ مقدار فرسایش بستر شده است. در مدل LBS، نیز بیشینهٔ عمق آب‌شستگی به‌اندازه ٦٢ درصد نسبت به مدل مبنا و ٤ درصد نسبت به مدل L کاهش داشته است. این مقدار کاهش در مقایسه با تأثیر سکو و شکاف در مقطع مستطیلی گرد گوشه بسیار اندک است.

در مدل با مقطع هندسی بیضی و عدسی، با ایجاد شکاف، شکل مقطع هندسی تغییر کرده و پایه دیگر آیرودینامیک نبوده و از انطباق آن با الگوی جریان کاسته می‌شود؛ بنابراین مقطع هندسی پایه تأثیر اندکی بر کاهش آب‌شستگی خواهد داشت. در مدل پایه L عمق فرسایش بستر در لحظات آغازین شبیه‌سازی بسیار کم است لیکن در مدل LB، از لحظات آغازین اجرای برنامه، تشدید فرسایش در اطراف لبه‌های شکاف دیده می‌شود. به‌عنوان‌مثال عمق فرسایش در دقیقه ۲۰ شبیه‌سازی برای مدل L برابر ۰/۵ میلی‌متر است درحالی‌که این مقدار در مدل LB مساوی ۱/۵ میلی‌متر است؛ بنابراین تأثیر مثبت ایجاد شکاف در مقطع هندسی عدسی به‌مراتب کمتر از تأثیر آن در مدل با مقطع مستطیلی گرد گوشه است. شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نمای دوبعدی و سه‌بعدی از آب‌شستگی اطراف پایه‌های مرکب RBS و LBS را نمایش می‌دهند.



(الف) (ب)

شکل (۲۰): فرسایش بستر پیرامون مدل LBS



(الف) (ب)

شکل (۲۱): فرسایش بستر پیرامون مدل RBS

در جدول (۸) درصد کاهش بیشینهٔ عمق آب‌شستگی برای مدل پایه‌های گروه D نسبت به مدل مبنا نشان داده شده است.

جدول ۸ بیشینهٔ عمق آب‌شستگی مدل پایه‌های گروه D

مدل پایه	D (mm)	D_{Bed} (mm)	d_s (mm)	d_s/D_{Bed}	r_{de} (%)
C	٤۰	٤۰	۲۹	۰/۷۲٥	---
CBS	٤۰	٦۰	۲۷	۰/٤٥	٦/۹
RBS	٤۰	٦۰	۱٤/٥	۰/۲٤۱	٥۰
EBS	٤۰	٦۰	۱٥	۰/۲٥	٤٨
LBS	٤۰	٦۰	۱۱	۰/۱٨۳	٦۲

عملکرد مدل پایه‌های گروه A در کنترل فرسایش بستر مطلوب‌تر از مدل‌های گروه B بوده است، یعنی استفاده از شکل هندسی آیرودینامیک در پایه‌های پل، نقش حفاظتی مؤثری در کاهش فرسایش بستر داشته است. در مدل‌های سکودار اگرچه ایجاد سکو در پایه موجب کنترل جریان‌های رو به پایین و گردابه‌های نعل‌اسبی می‌گردد لیکن افزایش قطر پایه در تراز بستر، موجب افزایش عرض انسداد و تشدید فرسایش بستر می‌شود. لذا کنترل جدایش جریان بسیار مؤثرتر از کنترل جریان رو به پایین در کاهش آب‌شستگی است. ترکیب سکو، شکل پایه و شکاف میانی نیز کاهش قابل توجّه در عمق آب‌شستگی را موجب شده است لیکن در این پایه‌ها احتمال گرفتگی و انسداد شکاف در اثر جابه‌جایی رسوبات وجود دارد. در این پایه‌ها با ایجاد شکاف، سطح مقطع پایه کاهش می‌یابد که ضعف سازه‌ای را به دنبال

دارد؛ بنابراین استفاده از پایه‌هایی با مقاطع آیرودینامیک می‌تواند به‌عنوان پیشنهاد کارهای آتی مطرح گردد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر شبیه‌سازی عددی پایه‌های پل ساده و مرکب با استفاده از نرم‌افزار Flow3D انجام گرفته است. به همین منظور در ابتدا گزارشی از نحوهٔ مدل‌سازی پایه-های پل در شرایط جریان زلال رودخانه‌ای ارائه شد که شامل مشخصات مدل فیزیکی و مدل عددی است. در ادامه، صحت‌سنجی پارامترهای مورد استفاده مانند اندازهٔ سلول‌های شبکه، مدل‌های آشفتگی و عمق فرسایش مورد بررسی قرار گرفت.

مدل پایه‌های مرکب با هدف بررسی دو پارامتر مهم در وقوع آب‌شستگی (جت جریان رو به پایین و جدایش جریان) مورد مطالعه قرار گرفته و درصد کاهش عمق آب‌شستگی آن‌ها نسبت به مدل پایه استوانه‌ای به دست آمد. نتایج نشان داد در اغلب موارد استفاده از یک ابزار کنترل آب‌شستگی بهتر از ترکیب ابزارهای مختلف عمل می‌نماید. به‌کارگیری شکل عدسی به‌عنوان مقطع هندسی پایه، توانست عمق آب‌شستگی را تا ۵۸ درصد کاهش دهد. مدل ترکیبی مقطع مستطیلی گردگوشه، سکو و شکاف نیز توانست فرسایش بستر را تا ۵۰ درصد کاهش دهد لیکن استفاده از مدل پایه‌های شکاف‌دار برای رودخانه‌هایی توصیّه می‌شود که در آنها حجم جابه‌جایی رسوبات پایین باشد.

فهرست علائم

سرعت متوسط	u
فشار	P
مساحت	A
شتاب ناشی از نیروهای وزنی	G
شتاب ناشی از نیروهای ویسکوز	f
تنش برشی دیواره	τ_b
دانسیته سیّال	ρ
ثابت ون کارمن	κ
ضریب زبری	k_s
کسر مربوط به قسمت سیّال	f
سرعت شناوری ذرات رسوب	u_{drift}
ضریب درگ ذرّه رسوب	k_t
ضریب شناوری	D_f
قطر متوسط ذرات رسوب	d_s
تنش برشی بحرانی	τ_{cr}
پارامتر شیلدز بحرانی	θ_{cr}
سرعت بلند شدن رسوبات	u_{Lift}
بردار نرمال	n_s
زاویهٔ اصطکاک داخلی رسوبات	ξ

مراجع

1. Breusers, H. N. C., and Raudkivi, A. J., "Scouring, In: Hydraulic Structures Design Manual", International Association of Hydraulic Research, Balkema, Vol. 2, pp. 143, (1991).
2. Raudkivi, A. J., and Ettema, R., "Clear-water scour at cylindrical piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 3, pp. 338-50, (1983).
3. Sumer, B. M., and Fredsoe, J., "The mechanics of the scour in the marine environment", *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 17, (2002).
4. Laursen, E. M., and Toch, A., "Scour around bridge piers and abutments", Iowa Highway Research Board Bulletin, No. 4, Bureau of Public Roads, Iowa, (1956).
5. Shen, H. W., Schneider, V. R., and Karaki, S. S., "Local scour around bridge piers", *Journal of the*

Hydraulics Division, Vol. 95 (HY6), pp. 1919–1940, (1969).

6. Melville, B. W., "Local scour at bridge sites", Rep. No. 117, Dept. of Civil Engineering, School of Engineering, Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand, (1975).
7. Dargahi, B., "Controlling mechanism of local scouring", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 10, pp.1197-1214, (1990).
8. Graf, W. H., and Istiarto, I., "Flow pattern in the scour hole around a cylinder", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 1, pp. 13-20, (2002).
9. Drysdale, D. M., "The effectiveness of an aerofoil shaped pier in reducing downstream vortices and turbulence", University of Southern Queensland, (2008).
10. Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F., and Cardoso, A. H., "Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 1, pp. 13-21, (2009a).
11. Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F., and Cardoso, A. H., "Countermeasures against Local Scouring at Bridge Piers: Slot and Combined System of Slot and Bed Sill", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 5, pp. 425-31, (2009b).
12. Gaudio, R., Tafarojnoruz, A., and Calomino, F., "Combined flow-altering countermeasures against bridge pier scour", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, No. 1, pp. 35-43, (2012).
13. Richardson, J., and Panchang, V., "Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at Bridge Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 5, pp. 530-540, (1998).
14. Yen, C., Sunglai, J., and Chang, W., "Modeling of 3D flow and scouring around circular piers", *proceeding of National Science Council*, Republic of China, Vol. 25, No. 1, pp.17-26, (2000).
15. Vasquez, J. A., and Walsh, B. W., "CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow", 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment. ISBN: 978-94-90365-01-1 (2009).
16. Abdelaziz, S., Bui, M. D., and Rutschmann, P., "Numerical simulation of scour development due to submerged horizontal jet", Institute of Hydraulic and Water Resources Engineering, Technische Universität München, Munich,Germany, (2011).

۱۷. مهرزاد، ر.، "بررسی تجربی و عددی پدیده آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه‌های مخروطی شکاف‌دار تحت جریان دائمی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند، (۱۳۹۰).

۱۸. اسدی پرتو، ا.، اقبال زاده، ا.، و احمدی، آ.، "بررسی اثر قطر پایه بر الگوی جریان در کانال مستقیم با استفاده از Flow3D"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه، (۱۳۹۱).

۱۹. حمیدی‌فر، ح.، امید، م. ح.، "شبیه‌سازی سه بعدی جریان در آبراهه‌های با مقطع مرکب با مدل Flow3D"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه، (۱۳۹۱).

۲۰. توحیدی، ح. ر.، "بررسی تجربی و عددی فرایند آب‌شستگی در اطراف پایه‌هایی با مرزهای جانبی متناسب با پروفیل سرعت تحت جریان دائمی"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند، (۱۳۹۲).

۲۱. حسن زاده، ی.، کاردان، ن.، و حکیم زاده، ح.، "مطالعه عددی سه‌بعدی مدل‌های ترکیبی شکل پایه و شکاف در کاهش تنش‌های برشی آغازکننده آبشستگی پیرامون پایه‌های پل، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست"، ٤٤(٤) صفحات ۳۹ الی ۵۰، (۱۳۹۳).

22. Flow Science, Inc., "FLOW-3D User's Manual", Flow Science, Inc, (2008).

23. Smith, H., and Foster, D., "Modeling of flow around a cylinder over a scoured Bed", *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 121-137, (2005).

24. Brethour, J. M., "Transient 3-d model for lifting, transporting and depositing solid material", International Symposium on Environmental University Hydraulics, Tempe, Arizona, (2001).

25. Soulsby, R. L., and Whitehouse, R. J. S. W., "Threshold of sediment motion in Coastal Environments, Proc", *Combined Australian Coastal Engineering and Port Conference, EA*, pp. 149-154, (1997).

26. Meyer-Peter, E., and Müller, R., "Formulas for bed-load transport", Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research, pp. 39–64, (1948).

27. Van Rijn, L. C., "Sediment transport, Part I: bed load transport", *Journal of Hydraulic Engineering,* 110(10), pp. 1431-1456, (1984).

۲۸. عبداللهی، م.، و عاطفی، غ. ع.، "شـــبیه‌ســـازی پدیده رهایی متناوب گردابه‌ها در یک جریان دو بعدی حول مانع مربعی در یک کانال، با استفاده از روش شبکه بولتزمن"، فصلنامه مکانیک هوافضا (مکانیک سیالات و آیرودینامیک)، ۷(٤) صفحات ۵۱ الی ٦۳، (۱۳۹۰).

29. Melville, B. W., and Chiew, Y. M., "Time Scale for Local Scour at Bridge Piers", *Journal of Hydraulic Engineering,* ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 59-65, (1999).